

BEST AVAILABLE COPY

Distance measurement, e.g. for industrial mfg. - correlating signals, e.g. from laser diode, passed along measurement path and via digital delay element

Patent number: DE4217423
Publication date: 1994-02-24
Inventor: SCHWARTE RUDOLF PROF DR ING (DE);
BUNDSCHUH BERNHARD DR ING (DE); KLEIN
RUEDIGER DIPL ING (DE)
Applicant: IFM ELECTRONIC GMBH (DE)
Classification:
- International: **G01S17/32; G01S17/00;** (IPC1-7): G01B21/00;
G01B9/02; G01B11/00; G01B11/14
- european: G01S17/32
Application number: DE19924217423 19920526
Priority number(s): DE19924217423 19920526

Report a data error here

Abstract of DE4217423

A measurement signal is passed along a measurement path and along a reference path. The output signals of the measurement and reference paths are fed to an evaluation circuit which determines the distance, i.e. the length of the measurement path. The measurement signal is generated with period T_p by a frequency controllable pseudo noise (PN) signal generator consisting of n shift registers. The comparison path is a digital delay element dependent on the clock frequency. The measurement and comparison path output signals are fed to a correlation network acting as the evaluation circuit.
USE/ADVANTAGE - For use in automated industrial manufacturing, e.g. for determining dimensions for quality control, or measuring surface roughness; also for connection to scanner in vehicle navigation system. Enables accurate measurement with minimal optical transmission power.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

①9 **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENTAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 42 17 423 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 B 21/00
G 01 B 9/02
G 01 B 11/14
G 01 B 11/00

⑳ Aktenzeichen: P 42 17 423.6
㉑ Anmeldetag: 26. 5. 92
㉒ Offenlegungstag: 24. 2. 94

DE 42 17 423 A 1

㉑ Anmelder:

i f m electronic gmbh, 45127 Essen, DE

㉒ Vertreter:

Gesthuysen, H., Dipl.-Ing.; von Rohr, H., Dipl.-Phys.,
Pat.-Anwälte, 45128 Essen

㉓ Erfinder:

Schwarte, Rudolf, Prof. Dr.-Ing., 57250 Netphen, DE;
Bundschuh, Bernhard, Dr.-Ing., 66540 Neunkirchen,
DE; Klein, Rüdiger, Dipl.-Ing., 57271 Hilchenbach, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

Der Inhalt dieser Schrift weicht von den am Anmeldetag eingereichten Unterlagen ab

㉔ Entfernungsmessverfahren

㉕ Gegenstand der Erfindung ist ein Entfernungsmessverfahren, wobei ein Meßsignal einerseits den Meßpfad und andererseits einen Vergleichspfad durchläuft, das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einer Auswerteschaltung zugeführt werden und durch die Auswerteschaltung die Entfernung, also die Länge des Meßpfads ermittelt wird.

Das erfindungsgemäße Entfernungsmessverfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal mit der Signalperiode T_p von einem in der Frequenz steuerbaren, aus n Schieberegistern bestehenden digitalen Pseudo-Rausch-Signalgenerator (Pseudo-Rausch-Signalgenerator = Pseudo-Noise = PN) erzeugt wird, daß als Vergleichspfad ein von der Taktfrequenz f_p abhängiges digitales Verzögerungsglied verwendet wird und daß das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einem Korrelationsnetzwerk als Auswerteschaltung zugeführt werden.

DE 42 17 423 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Entfernungsmeßverfahren, wobei ein Meßsignal einerseits den Meßpfad und andererseits einen Vergleichspfad durchläuft, das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einer Auswerteschaltung zugeführt werden und durch die Auswerteschaltung die Entfernung, also die Länge des Meßpfades ermittelt wird.

Auf dem Wege zu höherer Automatisierung, Flexibilisierung und Qualität in der industriellen Fertigung erfahren optische Sensorsysteme eine wachsende Beachtung und Anwendung. Die meisten Fertigungsschritte erfordern dimensionelle Messungen, z. B. für Aufgaben der Handhabung und der Montage, des Materialtransports sowie der Maßhaltigkeits-, Vollständigkeits- und Oberflächenqualitätsprüfung. Die heute verfügbaren optischen Sensoren bieten ein breites, stetig wachsendes Leistungsspektrum, um den hohen Anforderungen nach schneller, präziser und berührungsloser Überwachung des Fertigungsablaufes sowie der Qualitätssicherung der Fertigungsschritte zu genügen.

Technologische Fortschritte haben in den vergangenen Jahren ein geradezu unerschöpfliches Potential an dimensionellen optischen Meßverfahren geschaffen, das in der zukünftigen Automatisierung der industriellen Fertigung eine Schlüsselrolle spielen wird.

Die Vielfalt der ein-, zwei- und dreidimensionalen physikalisch-optischen Meßprinzipien läßt sich im wesentlichen auf drei grundlegende Verfahren zurückführen:

Triangulationsverfahren: Auf der Basis geometrischer Strahlenoptik werden Längen und Winkel gemessen. Typische Anwendungen sind: 1D- und 2D-Lasertriangulation, Lichtschnittverfahren, Stereovision, Photogrammetrie, Elektronische Theodolite, Moiré-Verfahren und 3D-Triangulation mittels strukturierter Beleuchtung sowie Fokus-Triangulation.

Laufzeitverfahren: Die Entfernung zu einem reflektierenden Objekt wird aus der Laufzeit des reflektierten Signals bestimmt. Je nach den Signalformen unterscheidet man Pulslaufzeit-Verfahren, Phasenlaufzeit- bzw. CW-Verfahren (CW : Continuous Wave) und Puls-Kompressions- bzw. Korrelationsverfahren. Zur Vermessung von 3D-Oberflächen wird das Meßsignal mit einem Scanner geschwenkt.

Interferometrische Verfahren: Zwei stationäre kohärente Wellenfelder werden überlagert und ergeben in Abhängigkeit vom Ort destruktive oder konstruktive Interferenz. Auf einer Oberfläche entsteht z. B. ein typisches Interferenzmuster, das über die Anzahl der Interferenzstreifen Auskunft über die Tiefe der 3D-Form in Wellenlängeneinheiten gibt. Auf diesem dimensionellen Meßprinzip beruht eine Vielzahl von Meßinterferometern (z. B. nach Michelson, Mach-Zehner, Fizeau, Twyman-Green usw.) sowie die Zwei-Wellenlängen-Heterodyn-Interferometrie, die Speckle-Interferometrie, die holographische Interferometrie und die Holographie.

Weitere Verfahren zur Erlangung von räumlichen Tiefeninformationen mit gegenwärtig geringer technischer Bedeutung beruhen auf

der Helligkeitsabnahme diffus reflektierender Oberflächen mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle, dem Schattenwurfverfahren, bei dem die Oberflächenhelligkeit durch den Einfallswinkel der Beleuchtung moduliert wird, und

der wissensbasierten 3D-Interpretation von 2D-Bildern (hohe Bedeutung bei biologischen Visualsystemen, vgl. Möglichkeit der 3D-Orientierung mit nur einem Auge in bekannter Umgebung!).

Meßsysteme nach den aufgeführten Meßprinzipien werden aufgrund wachsender Vielfalt und Leistungsfähigkeit der kommerziell erhältlichen Geräte zunehmend industriell eingesetzt. Wesentliche Kriterien für den industriellen Einsatz sind einerseits der Abstands- bzw. Tiefenmeßbereich,

andererseits die zugehörige Meßunsicherheit (z. B. ein- oder zweifache Standardabweichung).

Der wichtige Zusammenhang "Relative Meßunsicherheit $\Delta z/z = \text{Fkt. (Abstand } z)$ " ist in der Fig. 1 der Zeichnung für die weiter oben angesprochenen drei grundlegenden Meßprinzipien in Form der heute abdeckbaren Felder dargestellt.

Auf dem Triangulationsverfahren beruhen zahlreiche, industriell eingeführte Meßsysteme mit sehr unterschiedlichen Ausführungen und Eigenschaften.

Größte praktische Bedeutung haben Lasertriangulationsgeräte für dreidimensionale Aufgaben der Fertigung und Qualitätssicherung erlangt, z. B. eindimensionale Abstandsmessung mit einem kollimierten Laserstrahl und höhenabhängiger Laserspotabbildung auf einer CCD-Zeile bzw. einem 1D-PSD-Element (PSD = Position Sensitive Detector) oder zweidimensional mit zusätzlichem Scanner oder nach dem Lichtschnittverfahren mit einem Lichtvorhang und CCD-Array bzw. 2D-PSD als Detector. Das entsprechende Feld in der Abbildung liegt im Zentimeter- bis Dezimetermeßbereich bei relativen Meßunsicherheiten um ca. 10^{-3} . Die Fortführung dieser Entwicklungsrichtung bietet unter Verwendung einer dynamischen, strukturierten Beleuchtung sehr leistungsfähige Meßverfahren für 3D-Konturen. Für handliche Geräte wird die optische Basis (Abstand von Sender und Empfänger) auf wenige Dezimeter beschränkt bleiben, so daß bei größeren Entfernungen die Meßunsicherheit entsprechend dem aufsteigenden Ast im Bild zunimmt.

Neben diesen aktiven Triangulationsverfahren gibt es passive, die mit natürlicher Beleuchtung bzw. mit Fremdlicht-Beleuchtung auskommen. Fortschritte der Bildverarbeitung vor allem aufgrund wachsender Rechenleistung durch Parallelarchitekturen oder durch spezielle Hardwarelösungen erlauben in immer kürzeren Zeiten eine 3D-Bildauswertung von 2D-Stereo- bzw. Mehrfachbildern herkömmlicher CD-Kameras der gleichen Szene. Biologische Visualsysteme haben diese Problematik in Echtzeit hervorragend gelöst. Eine zeilenorientierte Kantendetektion, die in Hardware realisiert wurde, erreicht ebenfalls Echtzeitfähigkeit. Die erreichten Meßunsicherheiten liegen abstandsbezogen bei ca. 1–5‰ und lateral bei 1–2‰.

Höchste Präzision bei der 3D-Objektvermessung im Bereich von einem Meter bis hundert Meter liefert die

Photogrammetrie (3D-Auswertung von mehreren Fotos der gleichen Szene) sowie Mehrfach-Winkelmessungen zu definierten Objektpunkten mittels Theodoliten, wenn die Abstände der Meßstandorte in der Größenordnung des Meßobjektes liegen. Es werden Meßunsicherheiten von 10^{-5} erreicht, was im Bild durch den nach rechts unten verlaufenden Ast des Triangulationsfeldes veranschaulicht wird. Eine Automatisierung beider Verfahren mit der Erzeugung von Laserspotmarkierungen und Mehrfach-CCD-Bild- bzw. Winkelauswertungen führt zu sehr ähnlichen Meßsystemen — allerdings mit merklich reduzierter Auflösung entsprechend der Pixelauflösung der CCD-Kameras. Noch höhere Präzision in der optischen Formerfassung erreichen Koordinatenmeßmaschinen durch Kombination mechanischer und optischer Meßverfahren, z. B. mit einem mechanisch geführten Lasertriangulationstaster oder Laserfokus für Abstandsmessungen oder einer CCD-Kamera für Lateralmessungen. Die linke Seite des Triangulationsfeldes wird durch Fokussierungsverfahren bestimmt, die heute in der Lage sind, Auflösungen im nm-Bereich zu erreichen.

Beim Laufzeitverfahren liegt aufgrund der extremen geforderten Zeitauflösung (1 mm Hin- und Rückweg entspricht $2 \times 3,3$ Pikosekunden) eine relativ hohe Grundunsicherheit von etwa 1—10 mm bei Meßraten im Bereich von 10—100 Hz praktisch unabhängig von der Entfernung vor. Dadurch nimmt die relative Meßunsicherheit zu großen Entfernungen stetig ab. Die Pulslaufzeitmessung bzw. das Puls-Laserradar weist den größten Absolutmeßbereich auf. Dieses Verfahren ist aufgrund der geradlinigen Objekterfassung und direkten absoluten Abstandsmessung in Verbindung mit einem Scanner sehr gut für die Navigation autonom-mobiler Fahrzeuge geeignet.

Mittels Sinusmodulation bzw. CW-Laserradar wird bei verringerter Reichweite eine etwas höhere Auflösung erzielt. Der begrenzte Eindeutigkeitsbereich einer halben Wellenlänge kann z. B. durch Mehrfrequenzverfahren erweitert werden.

Interferometrische Verfahren decken — wie abgebildet — einen kleineren Meßbereich als das Triangulations- und Laufzeitverfahren ab, da die erforderliche Kohärenz bei Luftstrecken von einigen 10 Metern nicht zu gewährleisten ist. Die Entfernungsmessungen sind auf die Wellenlängen bezogen. Dadurch werden Auflösungen von wenigen Nanometern und relative Meßunsicherheiten von 10^{-7} erreicht. Man erhält allerdings nur Relativ- und keine Absolutmeßwerte.

Die Hauptanwendungsgebiete liegen in der Oberflächenmeßtechnik, bei Mikroprofil- und Rauheitsmessungen, in der Mikroelektronik, der integrierten Optik und der Mikrosystemtechnik.

Bei den gerätetechnischen Realisierungen der zahlreichen Interferometervarianten wird eine Verkleinerung durch Technologien der integrierten Optik angestrebt. Um den geringen Eindeutigkeitsbereich von nur einer Wellenlänge zu erhöhen, werden Zwei-Wellenlängen-Heterodyn-Interferometer verwendet. Eine rechnergestützte Interferenzstreifenauswertung nach einem räumlichen Heterodynverfahren erlaubt eine schnelle 3D-Profilerfassung und Darstellung, z. B. bei Mikroelektronikstrukturen. Die Holografische Interferometrie erlaubt die unmittelbare Messung von Oberflächenverformungen. Aus dem Interferogramm auf der Oberfläche aufgrund zweier Vergleichsmessungen kann die 3D-Verformung mit einer Auflösung bis etwa 10 nm sofort berechnet werden. Von Nachteil ist der eingeschränkte Dynamikbereich.

Mittels der Speckle-Interferometrie mit elektronischem Vergleich von Speckle-Bildern lassen sich Oberflächenprofile bei geringerer Auflösung, aber wesentlich größerer Meßdynamik und Meßgeschwindigkeit vermessen.

Weitere Kriterien für den Einsatz optischer Formerfassungsverfahren sind:

- der laterale Meßbereich,
- die laterale Meßunsicherheit,
- die Meßzeit bzw. Meßrate für Punkte, Oberflächen, Raumwinkel,
- die Anforderungen an das Meßobjekt, z. B. Reflektivität, Farben, Fremdlicht usw.,
- die Anforderungen an die Umgebung, z. B. Temperatur, EMV, Erschütterungen usw.,
- die Meßdatenauswertung und -ausgabe,
- Laserschutzklassen,
- Maße und Gewichte,
- Beschaffungs- und Betriebskosten.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein besonders vorteilhaftes Entfernungsmessverfahren anzugeben, also ein Meßverfahren, mit dem die Entfernung eines Teleobjektes innerhalb eines Meßbereichs erfaßt und in eine elektrische Größe, beispielsweise in eine Spannung, umgewandelt werden kann.

Das erfindungsgemäße Meßverfahren ist nun zunächst und im wesentlichen dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal mit der Signalperiode T_p von einem in der Frequenz steuerbaren, aus n Schieberegistern bestehenden digitalen Pseudo-Rausch-Signalgenerator (Pseudo-Rausch-Signalgenerator = Pseudo-Noise = PN) erzeugt wird, daß als Vergleichspfad ein von der Taktfrequenz f_B abhängiges digitales Verzögerungsglied verwendet wird und daß das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einem Korrelationsnetzwerk als Auswerteschaltung zugeführt werden.

Im folgenden wird das erfindungsgemäße Entfernungsmessverfahren im einzelnen beschrieben. Alle dieser Beschreibung entnehmbaren Verfahrensschritte bzw. verfahrensmäßigen Merkmale sind erfindungswesentlich, auch wenn Patentansprüche darauf nicht gerichtet sind. Das gilt auch für alle schaltungsmäßigen bzw. vorrichtungsmäßigen Merkmale. Gegenstand der Erfindung ist also nicht nur ein Entfernungsmessverfahren, Gegenstand der Erfindung ist vielmehr auch ein Entfernungsmesssystem bzw. eine Entfernungsmessschaltung bzw. eine Entfernungsmessvorrichtung.

Das von einem in der Frequenz steuerbaren, aus n Schieberegistern bestehenden digitalen Pseudo-Rausch-Signalgenerator (auch Pseudo-Noise bzw. PN genannt) erzeugte, in T_p periodische Meßsignal durchläuft zum einen die Meßstrecke d mit der Laufzeit τ_d , zum anderen ein von der Taktfrequenz f_B abhängiges digitales Verzögerungsglied mit der Laufzeit τ . Beide Signale werden dem Korrelationsnetzwerk zugeführt. Sind beide

Laufzeiten identisch, herrscht maximale Ähnlichkeit zwischen beiden Signalen und die Korrelationsfunktion zwischen den Signalen besitzt ein Maximum. Die erforderliche Regelkennlinie wird dadurch erreicht, daß das interne Signal $s(t - \tau)$ um insgesamt $T_B(s(t - \tau - T_B/2))$ und $s(t - \tau + T_B/2)$ verzögert und voneinander subtrahiert, mit der Empfangsfolge gemischt und anschließend tiefpaßgefiltert wird. Die Verzögerungszeit τ innerhalb des digitalen Verzögerungsgliedes hängt von der Schiebetaktfrequenz f_B ab, die proportional der VCO-Frequenz ist. Es existiert somit ein Zusammenhang zwischen der Meßstreckenlaufzeit τ_d und der Schiebetaktfrequenz f_B .

Der Zusammenhang zwischen der Schiebetaktfrequenz f_B und der Signalperiode T_p des Meßsignals lautet:

$$f_B = \frac{1}{M \cdot T_p} \quad M = 2^n - 1, \quad n = \text{Anzahl der Schieberegisterstufen}$$

Für den Fall $\tau_d = \tau$ gilt folgender Zusammenhang:

$$\tau_d = \tau = m \cdot T_B = m/f \approx m/U_{VCO},$$

U_{VCO} = Steuerspannung des VCO's

Die Korrelatorstruktur des Empfängers (auch Pseudo-Noise-Delay-Locked-Loop oder PN-DLL genannt) dient u. a. in der digitalen Kommunikationstechnik (speziell in der Frequenzspreiztechnik) der Detektion eines sehr breitbandigen Signals geringer Leistung, dessen Struktur dem Empfänger bekannt ist. Dort vergleicht der PN-DLL die Phasenlage ϕ_{DLL} der im PN-DLL erzeugten PN-Folge mit der Phasenlage ϕ_E der empfangenen und weitestgehend frequenzstarken PN-Folge und führt die Phase ϕ_{DLL} so lange nach, bis der Phasenfehler $\varepsilon_\phi = \phi_E - \phi_{DLL}$ Null wird, d. h. im eingeschwungenen Zustand enthält der Empfänger keinerlei Informationen über die Phasendifferenz zwischen dem gesendeten und empfangenen Signal. Nach der Phasennachführung sind die Frequenzen beider Signale identisch. Im Gegensatz dazu liegen bei dem Entfernungsmessverfahren beide Signale (Sende- und Empfangssignal) vor. Der Regelkreis führt hierbei die Schiebetaktfrequenz so nach, bis der Laufzeitfehler $\varepsilon = \tau_d - \tau$ den Wert Null erreicht. Es existiert eine Abhängigkeit zwischen Entfernung d und Schiebetaktfrequenz f_B .

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren unterscheidet sich von den bekannten Verfahren darin, daß die Einstellung der Phasenverschiebung zwischen Referenz- und Empfangssignal über die Variation der Taktfrequenz eines PN-Generators erfolgt. Die bekannten Verfahren arbeiten überwiegend mit einer festen Systemfrequenz wie auch nach dem Mehrfrequenzverfahren. Dieses Verfahren jedoch regelt die Laufzeitverzögerung der Meßstrecke durch das Nachführen der VCO-Frequenz nach Fig. 2.

Dadurch ergeben sich für die vom Schieberegister erzeugte PN-Folge verschiedene Chipzeiten T_c . Die Chipzeit entspricht der Dauer eines ausgesendeten Laserimpulses. Synchron zu der gesendeten Impulsfolge gelangt das Referenzsignal über ein L-stufiges Verzögerungsglied, welches technisch direkt im PN-Schieberegister implementiert ist, zur Korrelatoreinheit. Eine Verzögerung des Referenzsignals um eine Chip-Periode dient zur Erzeugung der benötigten ungeraden Regelkennlinie. Liegt die Summe aller Chipzeiten der letzten L-Pulse in der Größenordnung der Signallaufzeit des Meßsignals, so ist die richtige Frequenz für die aktuelle Entfernung gefunden.

Das reflektierte, gestörte Signal gelangt über einen Photoempfänger zur Korrelatoreinheit und wird dort mit der Referenzfolge und der um T_c verzögerten Referenzfolge gefiltert. Im eingeschwungenen Zustand besteht maximale Ähnlichkeit zwischen Empfangs- und Referenzfolge.

Der Lasersender wandelt das vom PN-Generator erzeugte Signal in ein intensitätsmoduliertes optisches Signal. Die Anforderungen an den Lasersender liegen hauptsächlich in der hohen analogen Modulationsbandbreite sowie in einer automatischen Vorstromnachführung in Abhängigkeit der abgestrahlten und empfangenen optischen Leistung. Um ein optimales Einschwingverhalten bei impulsförmiger Stromsteuerung zu erhalten, muß erst eine genügend hohe Ladungsträgerkonzentration vorhanden sein, damit der Prozeß der induzierten Emission anlaufen kann. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Photonendichte im Halbleiter wird daher die Laserdiode mit einem Vorstrom im Bereich des Schwellstromes betrieben. Die Modulation erfolgt durch Addition des Modulationsstromes zum Schwellstrom. Um eine hohe Dynamik am Sendeelement zu erreichen, ist die Pulsleistung möglichst hoch und die Ruheleistung möglichst gering zu halten. Dazu wird der Vorstrom knapp unterhalb des Schwellstroms betrieben. Die Emission wird hierbei noch überwiegend von spontanen Rekombinationen erzeugt und hält sich damit im Bereich niedriger Intensität. Die Photonendichte ist dabei ausreichend hoch und ermöglicht somit ein schnelles Anlaufen der stimulierten Übergänge bei zusätzlicher Strominjektion. Die Treiberschaltung zur Modulation des Laserdiodenstromes erzeugt Stromanstiegszeiten bis in den Nanosekundenbereich und ist bezüglich der geforderten Bandbreite ausreichend schnell.

Das von der Laserdiode abgestrahlte Licht mit einer Wellenlänge von 780 nm wird in eine 400-µm-Glasfaser eingekoppelt und der integrierten Sende- und Empfangsoptik zugeführt. Die eingekoppelte optische Leistung beträgt 0,8–1,5 mW.

Ein Ziel der Entwicklung bestand darin, die optische Sendeleistung so gering wie möglich zu halten, um auch Anwendungen, die eine hohe Augensicherheit erfordern, gerecht zu werden. Die empfangene optische Leistung, die über eine Glasfaser von der Spiegeloptik zum Photodetektor gelangt, beträgt je nach Reflektivität des Zielobjektes nur wenige Nanowatt bei einer Sendeleistung von 1 mW. Zur Verstärkung der sehr geringen Empfangsleistung werden aufgrund ihrer inneren Verstärkung nur Avalanche-Photodioden mit hohen Sperrspannungen eingesetzt. Der Stromverstärkungsfaktor innerhalb der APD hängt stark von der Sperrspannung und der Temperatur der Diode ab. Die APD-Vorspannungsregelung sorgt für einen konstanten Stromverstärkungsfaktor im optimalen Bereich, der einen Kompromiß zwischen thermischem Rauschen, das bei geringen

Verstärkungen, und Schrotrauschen, das bei hohen Verstärkungen dominiert, darstellt. Eine Möglichkeit der Arbeitspunktstabilisierung ist die Regelung der Gesamtverstärkung des optischen Empfangselementes auf den erforderlichen Wert durch den Einsatz einer Konstantstromquelle in Verbindung mit einer zwischen der Stromquelle und dem Kathodenanschluß der APD nach Masse liegenden Kapazität. Für den Fall einer kleiner werdenden Verstärkung sinkt die Vorspannung der Diode ab und die innere Verstärkung sowie der Strom durch die Diode werden geringer. Der Überschußstrom von der Konstantstromquelle bewirkt eine Erhöhung der Kondensatorspannung und somit eine Erhöhung der Vorspannung auf den zuvor eingestellten Wert. Diese Methode sorgt für eine ausreichende Verstärkungsregelung.

Bezüglich der benötigten Bandbreite bei gleichzeitiger hoher Verstärkung und Empfindlichkeit wurde als Schaltungsstruktur das Transimpedanzschaltungsprinzip in Verbindung mit einer Avalanche-Photodiode im Eingangskreis gewählt.

Der Verstärker besteht aus drei kostengünstigen MMIC-Stufen, wobei die Eingangsstufe im Transimpedanzbetrieb arbeitet. Ein weiteres Schaltungskonzept besteht aus einer diskret aufgebauten Transimpedanz-Eingangsstufe mit nachfolgendem Mikrowellenverstärker.

Bei einer Spannungsverstärkung von 80 dB und einer Bandbreite von 130 MHz ist eine Detektion von schwarzem Papier bei 4 m Entfernung durchaus möglich.

Zentrales Bauelement in dem Korrelatornetzwerk ist ein 500-MHz-4-Quadranten-Breitbandmultiplizierer. Diskret aufgebaute Multiplizierer besitzen zwar gute Eigenschaften bezüglich ihrer Bandbreite, jedoch läßt das Temperaturverhalten einige Wünsche offen, so daß mittlerweile ausschließlich integrierte Schaltkreise eingesetzt werden. Eingangssignale des Korrelationsnetzwerkes sind zum einen die beiden Referenzfolgen, zum anderen die gestörte Empfangsfolge. Abweichend von dem klassischen Delay-locked-loop-Konzept handelt es sich hier um einen PN-PLL, der gegenüber dem DLL bezüglich der Rauschleistungsdichte und erforderlichen Schaltungsaufwand günstigere Eigenschaften besitzt. Während der PLL die Phasenlage zweier harmonischer Signale nachregelt, geschieht dies beim DLL bzw. PN-PLL mit zwei Breitbandsignalen unter Berücksichtigung ihrer Kreuzkorrelationsfunktionen. In Fig. 3 ist die Ausgangsspannung des Korrelators bei einem ungestörtem Empfang sowie bei einem Signal- zu Rauschabstand von -30 dB mit dazugehöriger Testschaltung dargestellt.

Der PN-Generator mit einer Wortlänge von 511 Bit ist einfach zu realisieren und besteht im wesentlichen aus 9 ECL-Schieberegistern mit den entsprechenden Leitungstreibern zur Signalübertragung.

Beigefügt sind einige charakteristische Kennlinien des Meßsystems ohne Berücksichtigung eines Sensorrechners. Zu beachten ist, daß die Diskriminatorkennlinien für den offenen Regelkreis gelten. Die Fig. 4—9 zeigen für verschiedene Entfernungen und Zielobjekte jeweils die Ausgangsspannung des Korrelators in Abhängigkeit der Frequenz. Fig. 10 zeigt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Frequenz und Entfernung bei geschlossenem Regelkreis. In Fig. 11 ist die VCO-Spannung des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit der Zeit t bei verschiedenen Entfernungsänderungen im cm-Bereich um einen Meßabstand von 3 m dargestellt.

Die gemessenen Entfernungen auf verschiedene Zieloberflächen zeigen, das selbst bei schwach reflektierenden Zielen eine Detektion der Diskriminatorkennlinie möglich ist. Für den Fall der maximalen Korrelation zwischen Empfangs- und Sendesignal ist die Ausgangsspannung des Korrelators null Volt. Bei schwach reflektierenden Objekten liegt die Amplitudenspannung der Diskriminatorkennlinie im Millivoltbereich, so daß schon kleine Offsetspannungen eine vertikale Verschiebung der Diskriminatorkennlinie hervorrufen und somit einen Meßfehler verursachen. Zur Zeit wird die Möglichkeit untersucht, die komplette offsetbehaftete Diskriminatorkennlinie mit einem Mikrocontroller zu erfassen, um den Fangpunkt softwaremäßig zu ermitteln.

Die bisherigen Arbeiten befaßten sich vorwiegend mit dem Problem der Meßsignalerfassung sowie den daraus resultierenden schaltungstechnischen Realisationen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, daß dieses Verfahren prinzipiell zur Entfernungsmessung geeignet ist. Inwieweit dieses Verfahren den hohen industriellen Anforderungen genügen wird, hängt u. a. von der elektromagnetischen Verträglichkeitsuntersuchung ab und kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verläßlich beurteilt werden.

Neben den fortlaufenden Optimierungen an den einzelnen Komponenten liegen die derzeitigen Arbeitsschwerpunkte gemäß den Arbeitspaketen darin, die Langzeitdrift, die Reproduzierbarkeit der Messungen sowie die damit verbundene Kalibrierung des Meßsystems zu untersuchen. Maßnahmen zur Erhöhung der Meßgenauigkeit wie z. B. die Entwicklung speziell für dieses Verfahren geeigneter Referenzmeßtechniken sind Inhalt zukünftiger Arbeiten.

Im übrigen zeigen

Fig. 12 das Blockschaltbild des Gesamtsystems,

Fig. 13 den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Taktfrequenz und Entfernung,

Fig. 14 ein Meßbeispiel,

Fig. 15 eine Darstellung des zugrundeliegenden Korrelationsmeßverfahrens,

Fig. 16 den Funktionsverlauf von $g_L(T_B)$ (oben) und von $g_L(f_B)$ (unten) für $\tau_d = 60$ ns, $m = 5$ und $n = 10$,

Fig. 17 die Korrelatorstruktur,

Fig. 18 eine der Fig. 15 entsprechende Darstellung des Funktionsverlaufs von $g_L(T_B)$ und von $g_L(f_B)$ und

Fig. 19 den charakteristischen Verlauf zweier Empfangssignale mit den entsprechenden Diskriminatorkennlinien.

Für Fig. 12 gilt:

n Anzahl der Registerstufen

m Anzahl der Verzögerungsstufen

f_B Bittakt $f_B = 1/T_B$

τ Verzögerungszeit, Entfernungsschätzwert

$D(e)$ Diskriminatorfunktion

ϵ Entfernungsschätzfehler $\epsilon = \tau_d - \tau$

τ_d Laufzeit der Meßstrecke.

Die Ermittlung des Entfernungsschätzwertes erfolgt am Beispiel einer in $T_p = nT_B$ periodischen Rechteckfolge $s(t)$ durch Variation der Taktfrequenz $f_B = 1/T_B$, siehe Fig. 15, auf der Grundlage des folgenden Gleichungssystems:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0(t - n \cdot T_p) \text{ mit } s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_B}\right)$$

Mit

$$h(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$

und

$$g_L(t, \tau) = z(t, \tau) * h(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} z(u, \tau) du$$

sowie

$$T_B = T_p/n, \tau = m \cdot T_B$$

folgt:

$$g_L(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t-\tau) \cdot s(t-\tau_d) dt$$

Integration über eine Periode ergibt:

$$g_L(T_B) = \frac{1}{T_p} (\tau + T_B - \tau_d) = \frac{1}{nT_B} [T_B(m+1) - \tau_d];$$

$$\frac{\tau_d}{m+1} \leq T_B \leq \frac{\tau_d}{m}$$

$$g_L(T_B) = \frac{1}{T_p} (\tau_d + T_B - \tau) = \frac{1}{nT_B} [-T_B(m-1) + \tau_d];$$

$$\frac{\tau_d}{m} \leq T_B \leq \frac{\tau_d}{m-1}$$

Mit $f_B = 1/T_B$ entsteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Mittelweg von $z(t, T_B)$ und der Taktfrequenz f_B bzw. der Verschiebung $\tau = mT_B$.

$$g_L(f_B) = \frac{1}{n} [(m+1) - \tau_d f_B];$$

$$\frac{m}{\tau_d} \leq f_B \leq \frac{m+1}{\tau_d}$$

$$g_L(f_B) = \frac{1}{n} [-(m-1) + \tau_d f_B];$$

$$\frac{m-1}{\tau_d} \leq f_B \leq \frac{m}{\tau_d}$$

Mit

$$\Lambda\left(\frac{t}{T}\right) = 1 - \left|\frac{t}{T}\right| \text{ für } \left|\frac{t}{T}\right| \leq 1$$

5

folgt:

$$g_L(f_B) = \frac{1}{n} \Lambda\left(\frac{f_B - m/\tau_d}{1/\tau_d}\right)$$

10

Die Diskriminatorkennlinie entsteht durch die Differenzbildung zweier verschobener Korrelationsfunktionen, siehe Fig. 17.

Für eine periodische Rechteckfolge als Eingangssignal ergeben sich die folgenden Beziehungen:

15

$$g_L(T_B) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t - \tau_d) \cdot [s(t - mT_B + T_B/2) - s(t - mT_B - T_B/2)] dt$$

20

Mit $T_B = 1/f_B$ folgt:

25

$$g_L(f_B) = \frac{1}{n} \left[\Lambda\left(\frac{f_B - (m+1)/\tau_d}{1/\tau_d}\right) - \Lambda\left(\frac{f_B - (m+1)/\tau_d}{1/\tau_d}\right) \right]$$

30

Der Übergang von einem periodischen Rechtecksignal zu einer periodischen Pseudo-Rauschfolge ist aufgrund der ähnlich verlaufenden Autokorrelationsfunktion möglich (Impulskompression).

35

Patentansprüche

1. Entfernungsmessverfahren, wobei ein Meßsignal einerseits den Meßpfad und andererseits einen Vergleichspfad durchläuft, das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einer Auswerteschaltung zugeführt werden und durch die Auswerteschaltung die Entfernung, also die Länge des Meßpfades ermittelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal mit der Signalperiode T_p von einem in der Frequenz steuerbaren, aus n Schieberegistern bestehenden digitalen Pseudo-Rausch-Signalgenerator (Pseudo-Rausch-Signalgenerator = Pseudo-Noise = PN) erzeugt wird, daß als Vergleichspfad ein von der Taktfrequenz f_B abhängiges digitales Verzögerungsglied verwendet wird und daß das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal einem Korrelationsnetzwerk als Auswerteschaltung zugeführt werden.

40

2. Entfernungsmessverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal mittels einer Laserdiode über den Meßpfad gesendet wird.

3. Entfernungsmessverfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal als Amplitudenmodulation dem Laserlicht aufmoduliert wird.

50

4. Entfernungsmessverfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal in Form von Phasensprüngen dem Laserlicht aufmoduliert wird.

5. Entfernungsmessverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsignal im als digitales Verzögerungsglied ausgeführten Vergleichspfad um den Kehrwert der Taktfrequenz f_B verzögert wird.

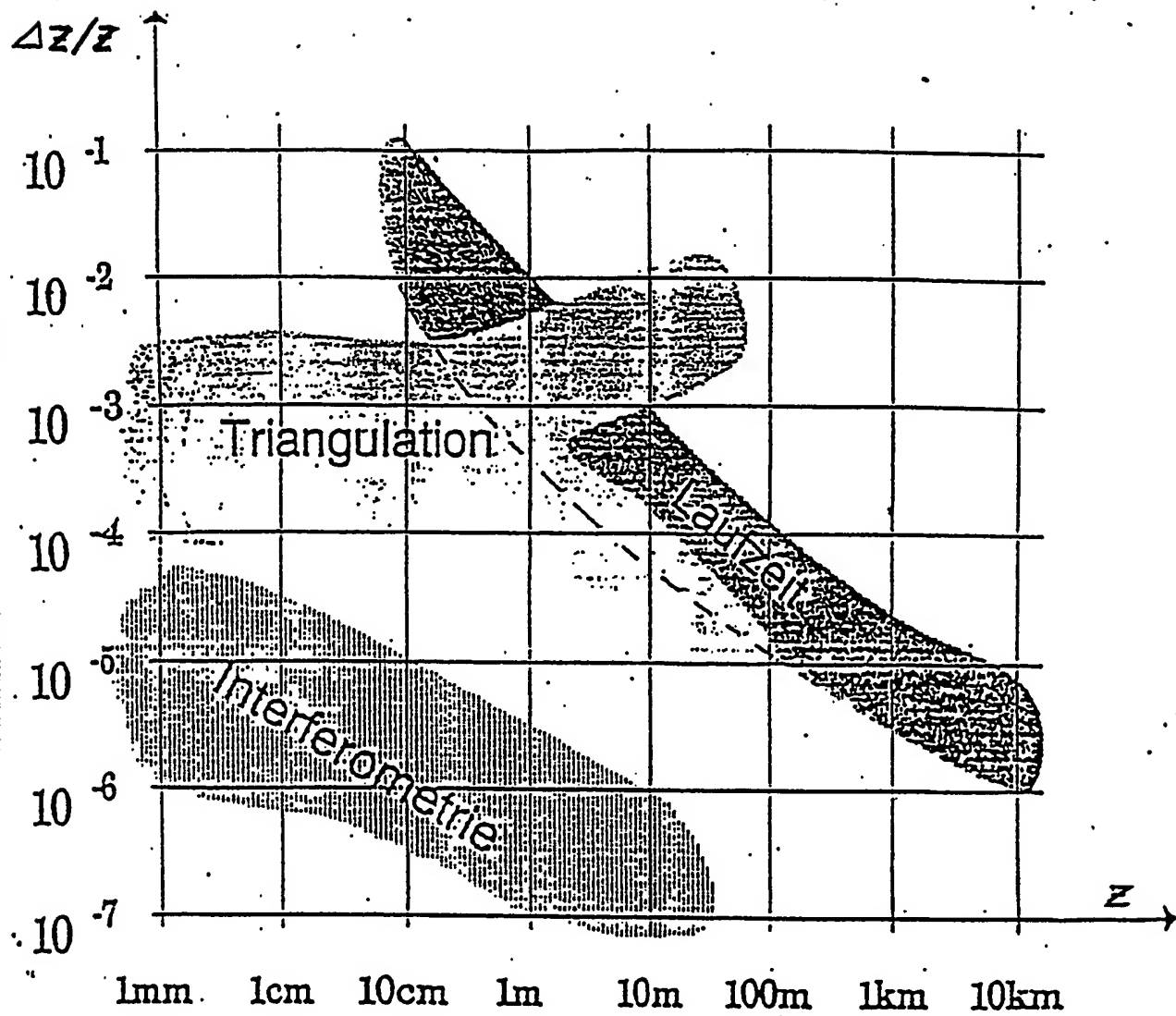
55

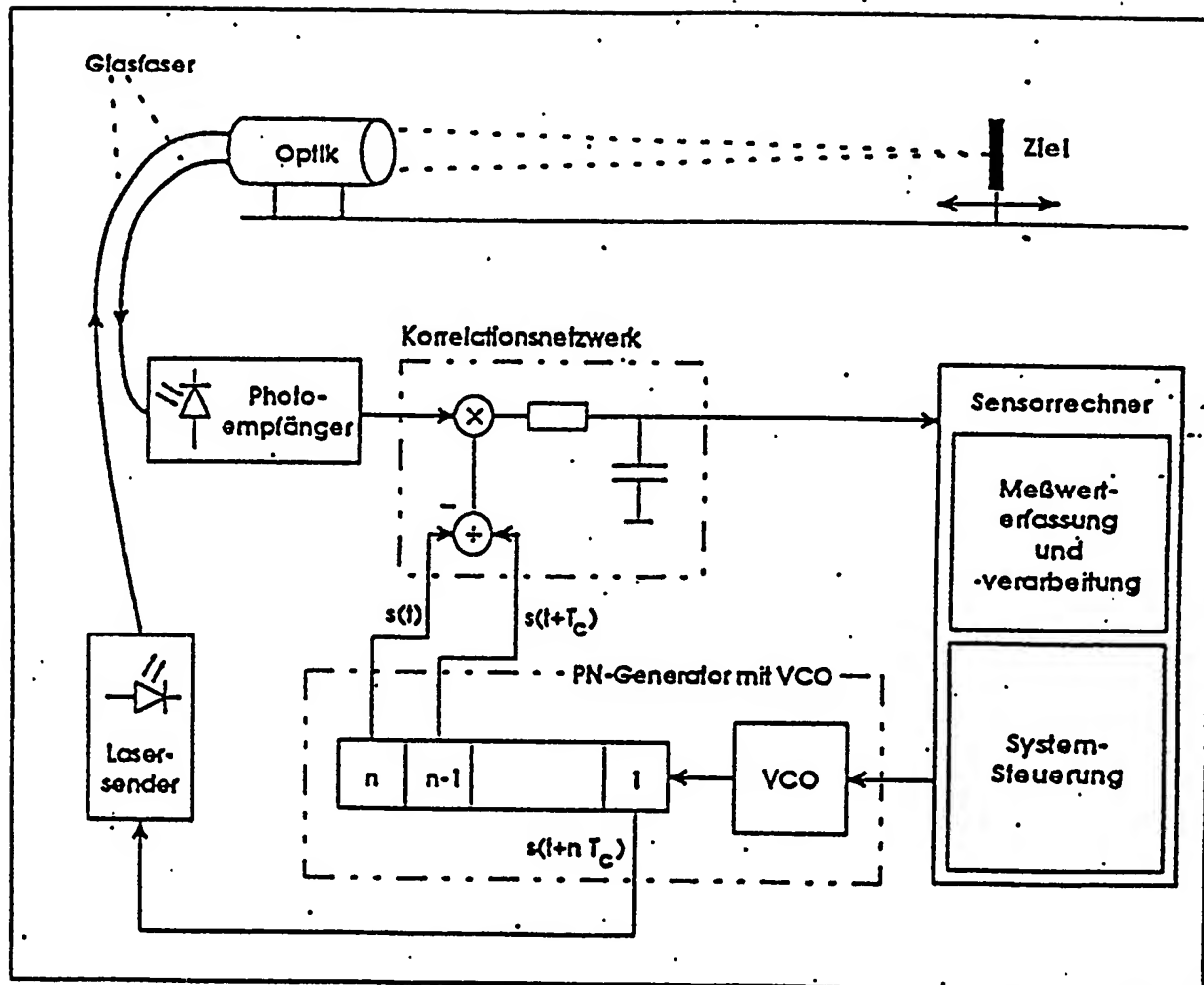
6. Entfernungsmessverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßpfadausgangssignal und das Vergleichspfadausgangssignal gemischt werden und das daraus entstandene Mischsignal tiefpaßgefiltert wird.

Hierzu 17 Seite(n) Zeichnungen

60

65

*Fig. 1*

*Fig. 2*

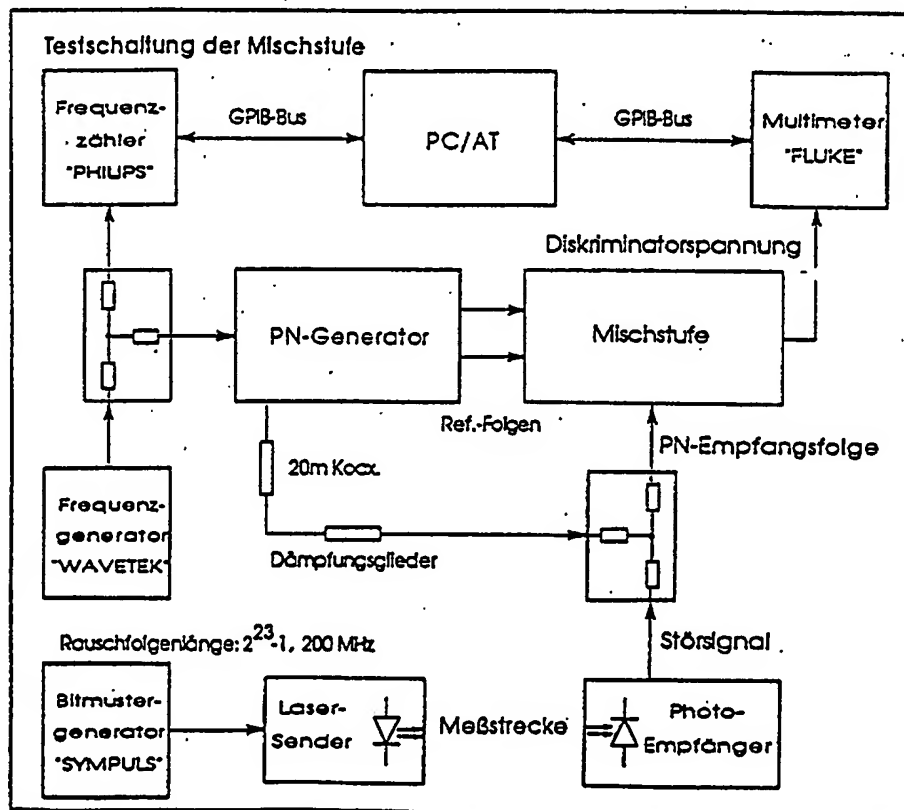
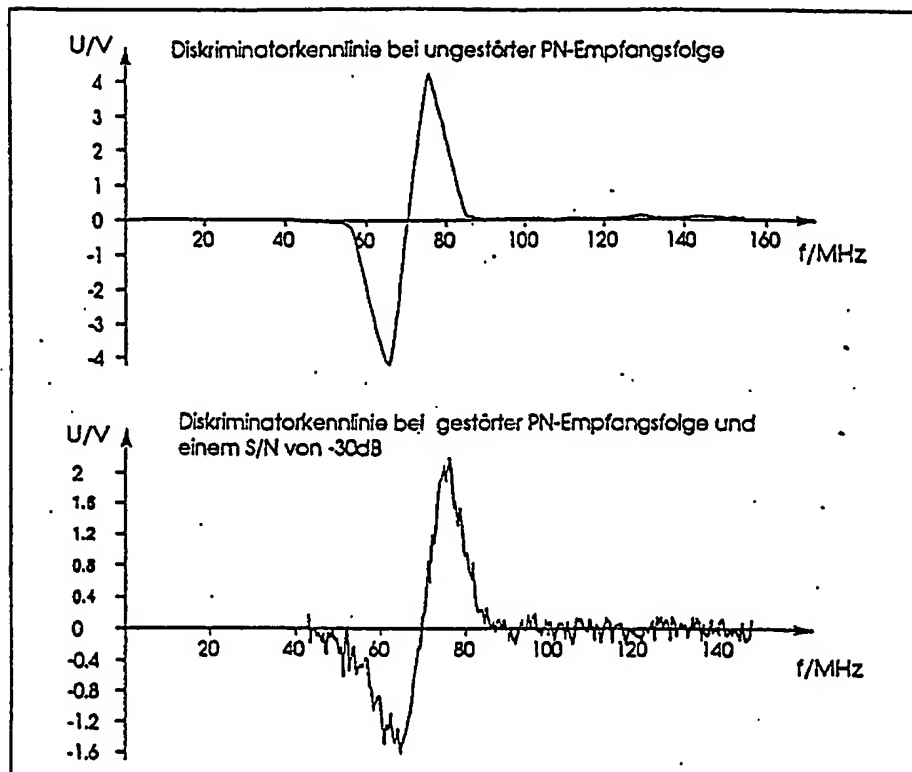


Fig. 3

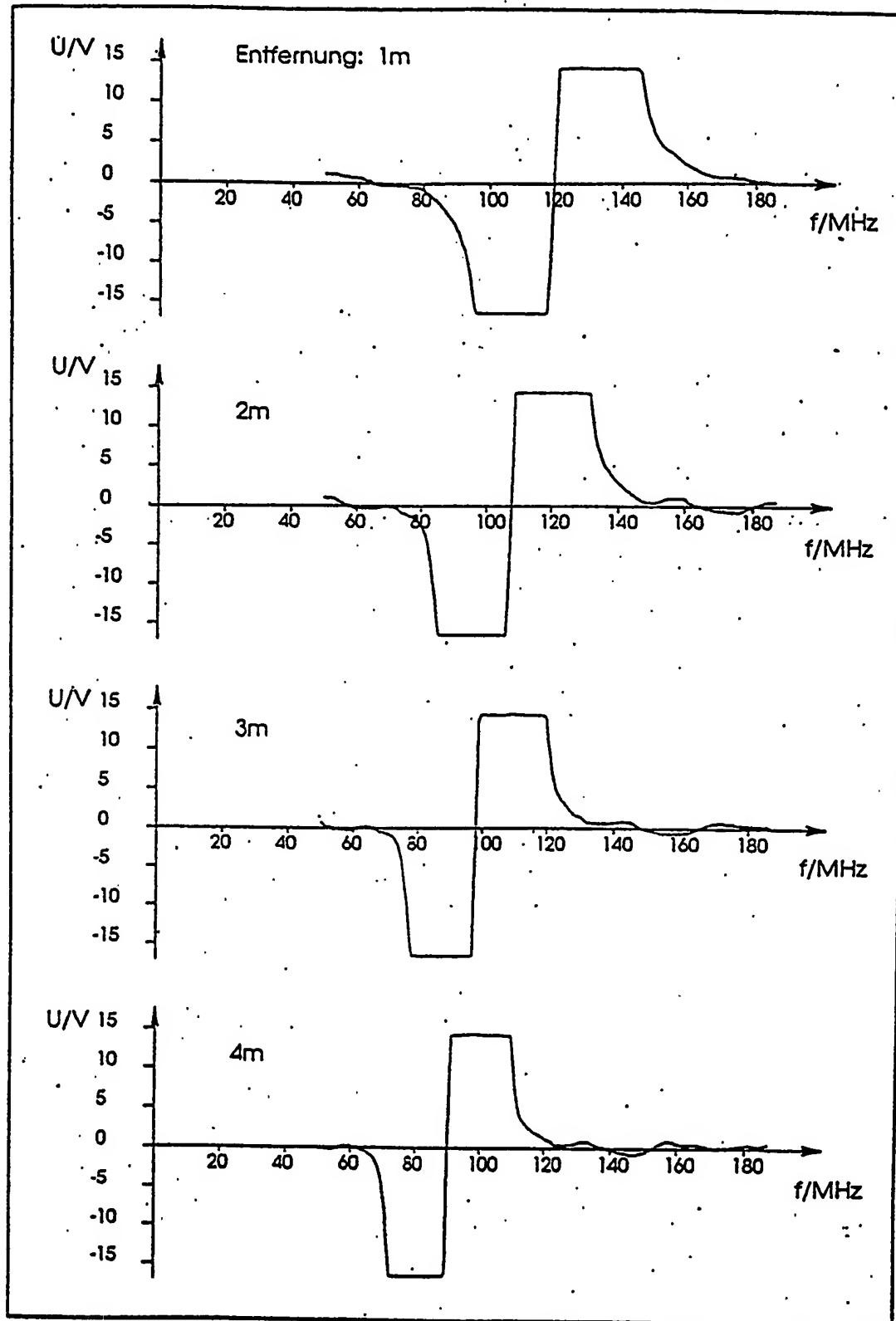
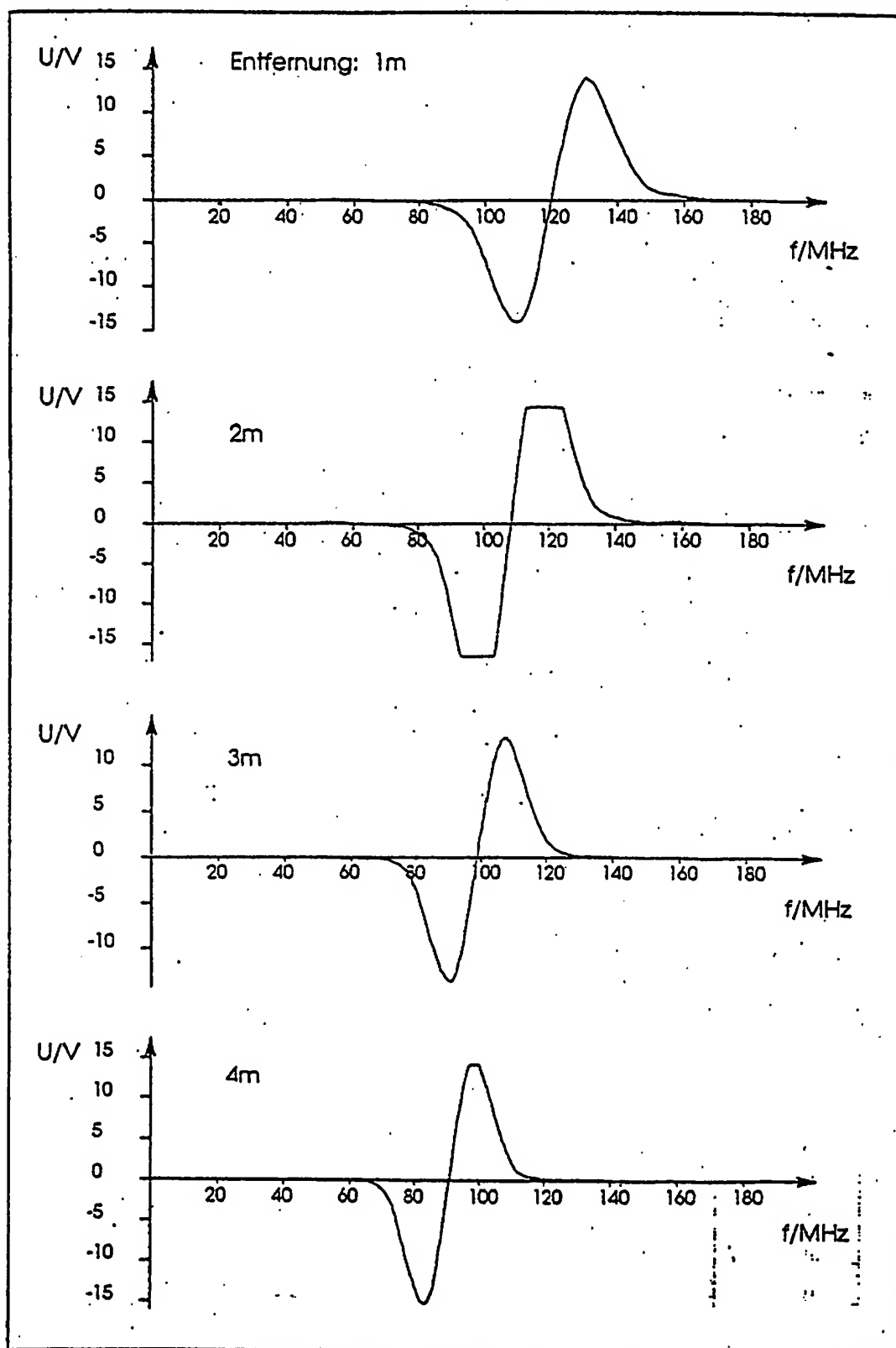
Diskriminatorcharakteristiken für Retrö bei verschiedenen Zielentfernungen

Fig. 4

Diskriminatorkennlinien für Aluminium glänzend bei verschiedenen Zielentfernungen*Fig. 5*

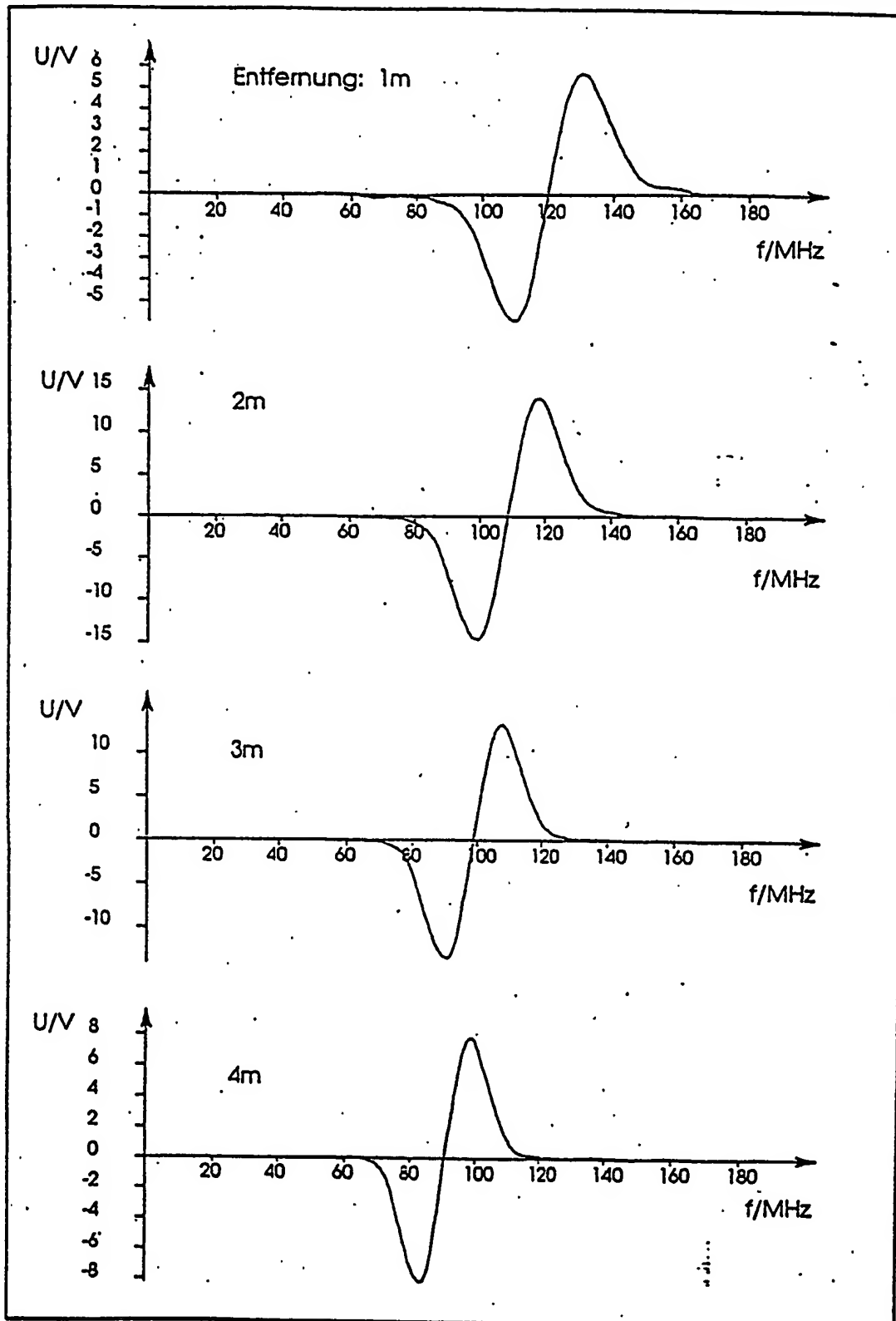
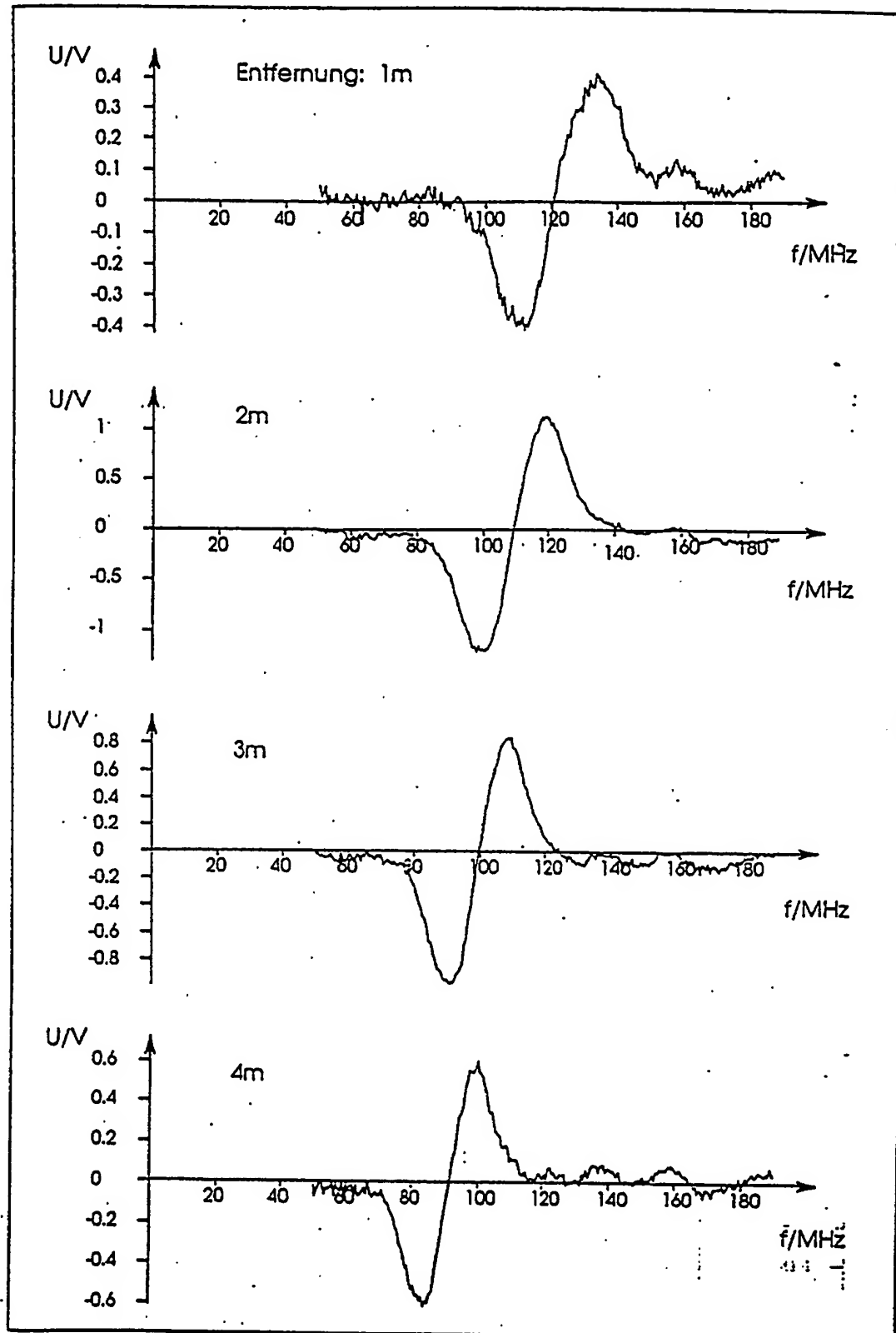
Diskriminatorkennlinien für Aluminium matt bei verschiedenen Zielentfernungen

Fig. 6

Diskriminatorkennlinien für Guß bei verschiedenen Zielentfernungen*Fig. 7*

Diskriminator Kennlinien für Pappe blau bei verschiedenen Zielentfernungen

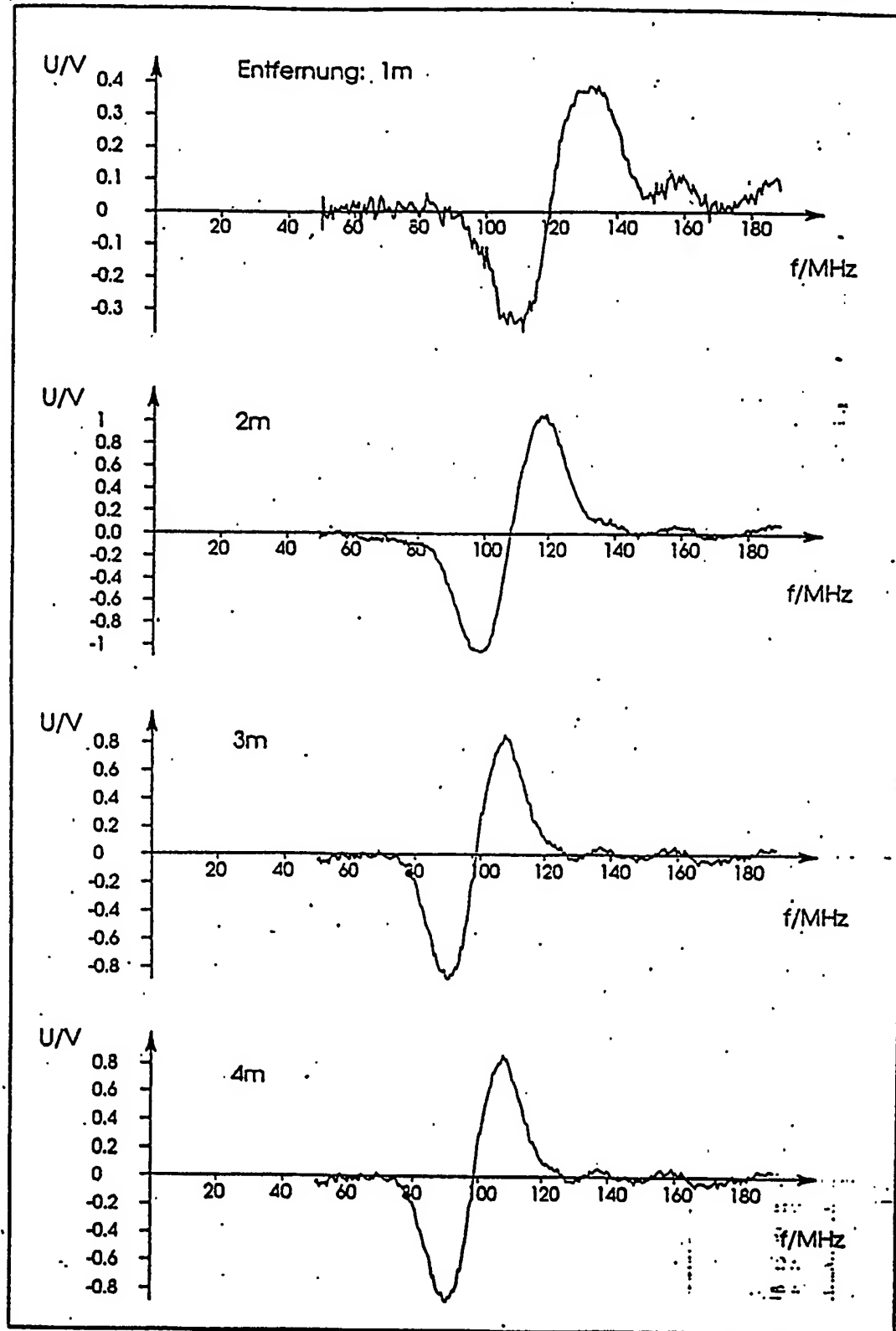


Fig. 8

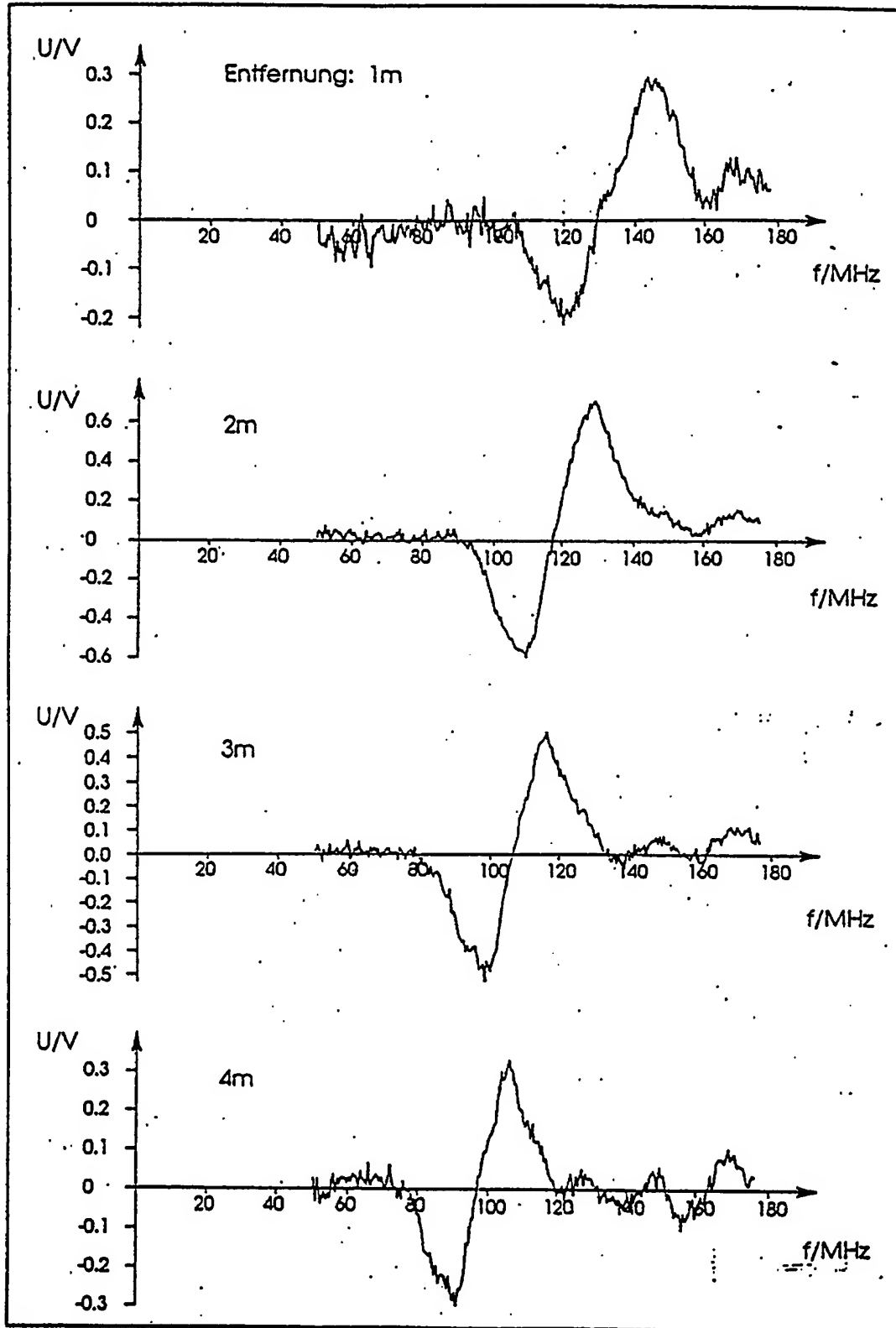
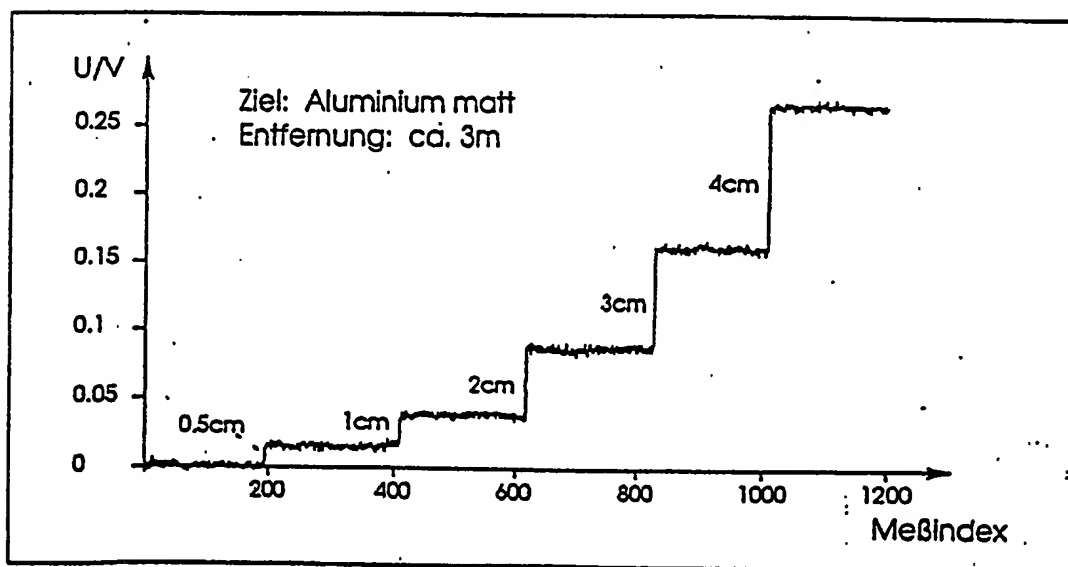
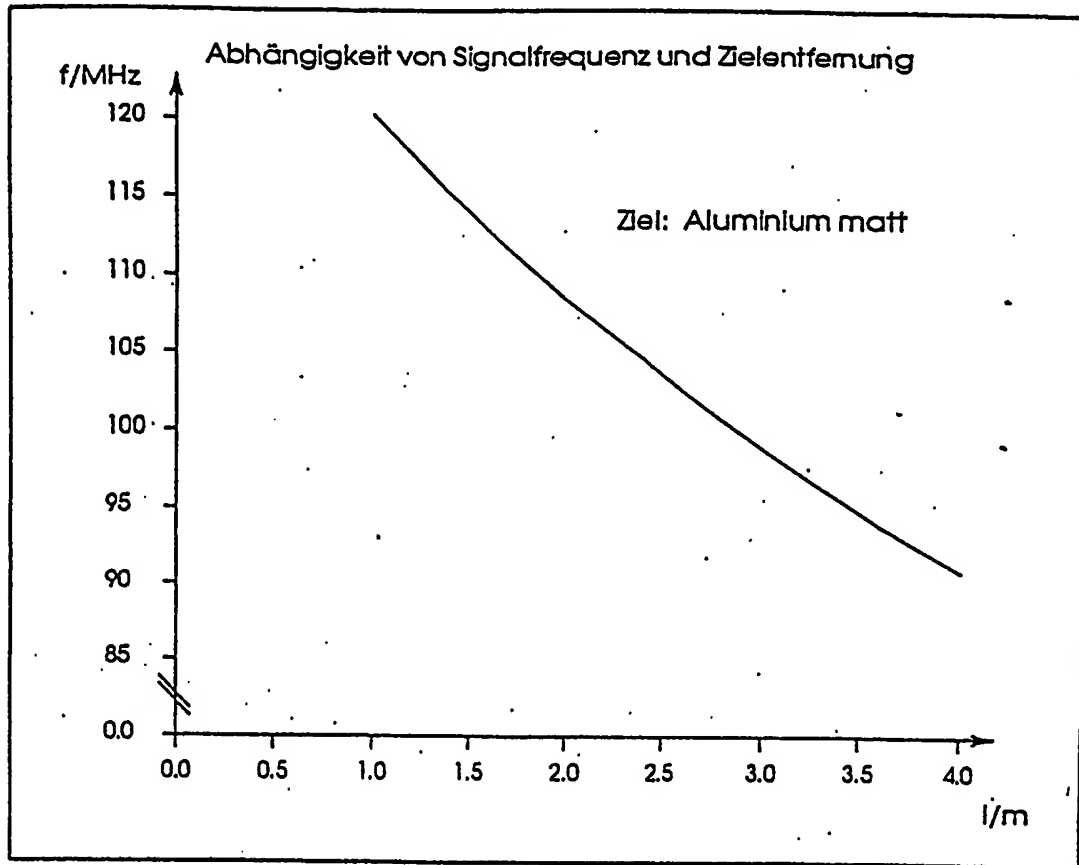
Diskriminator Kennlinien für Papler schwarz bei verschiedenen Zielentfernungen*Fig. 9*

Fig. 10*Fig. 11*

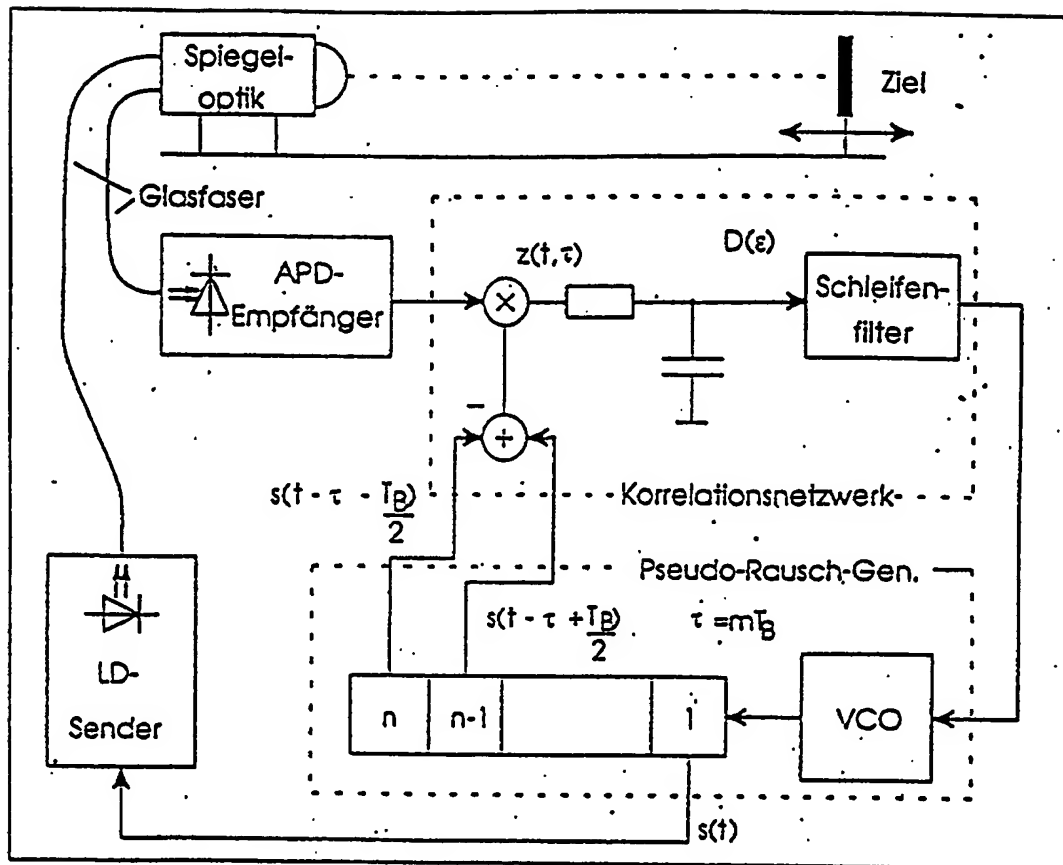
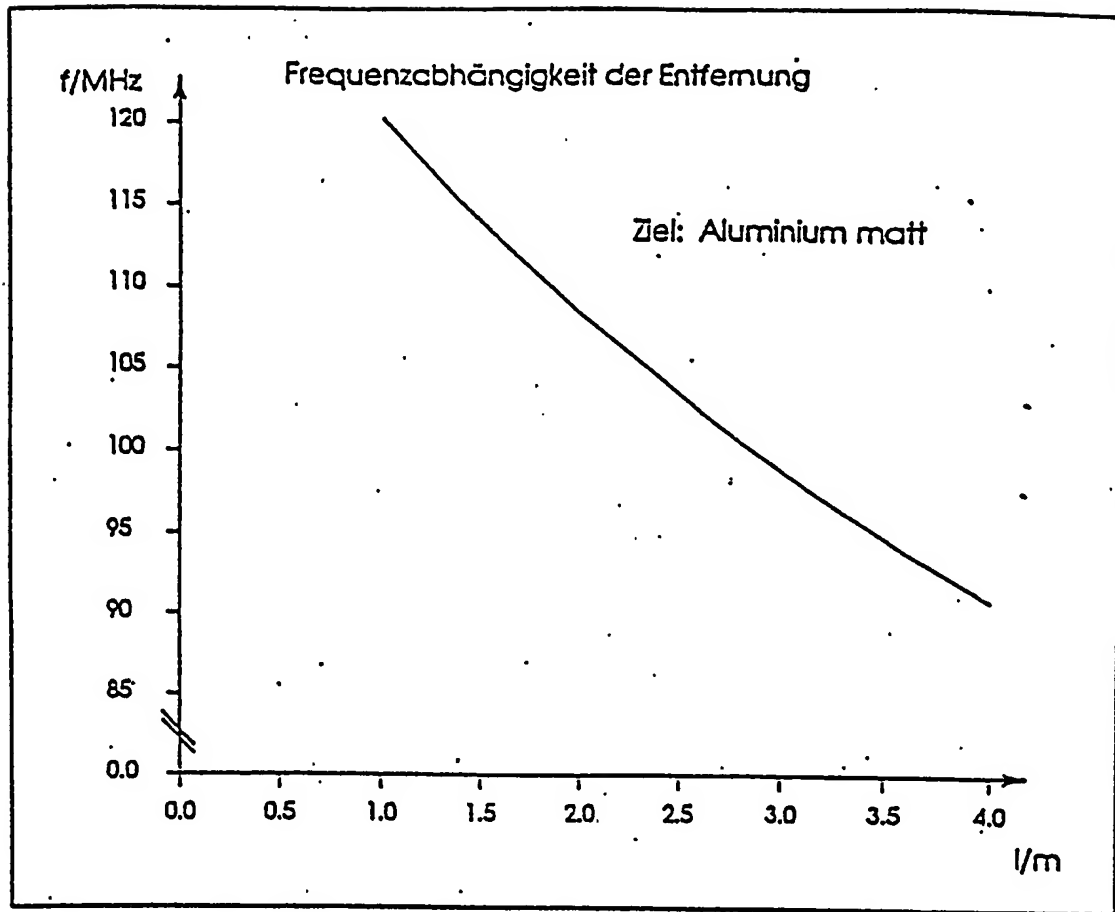


Fig. 12

*Fig. 13*

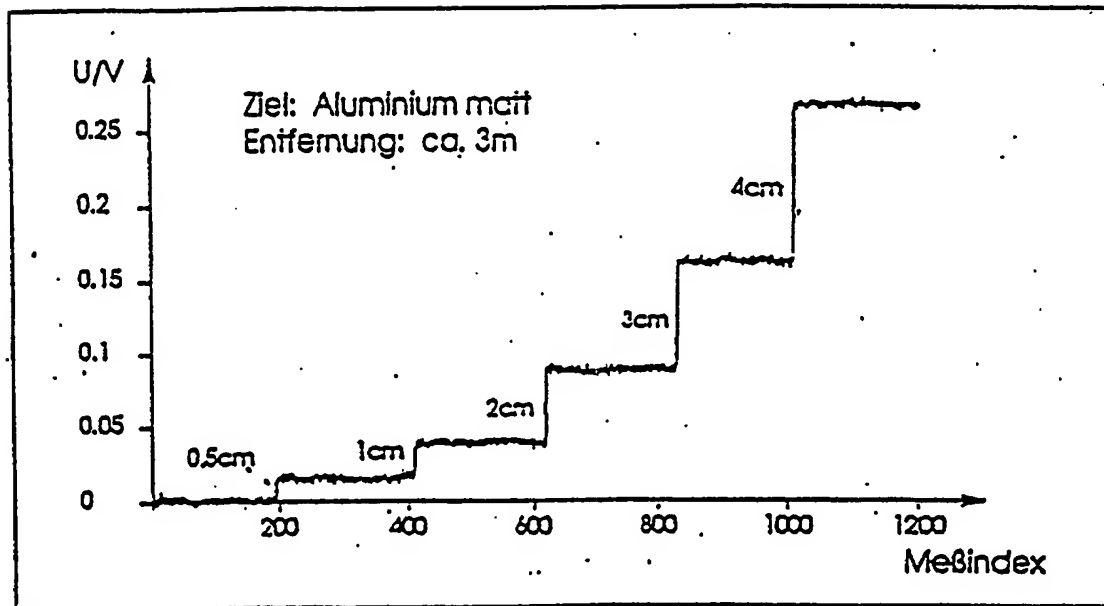
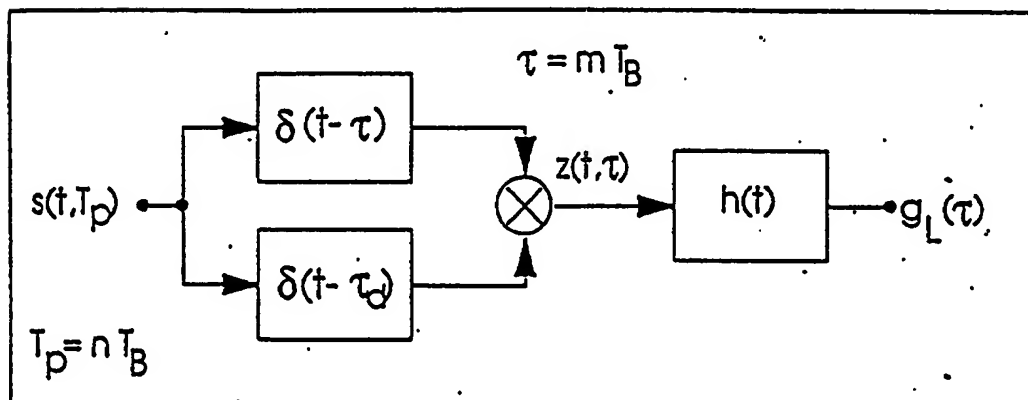
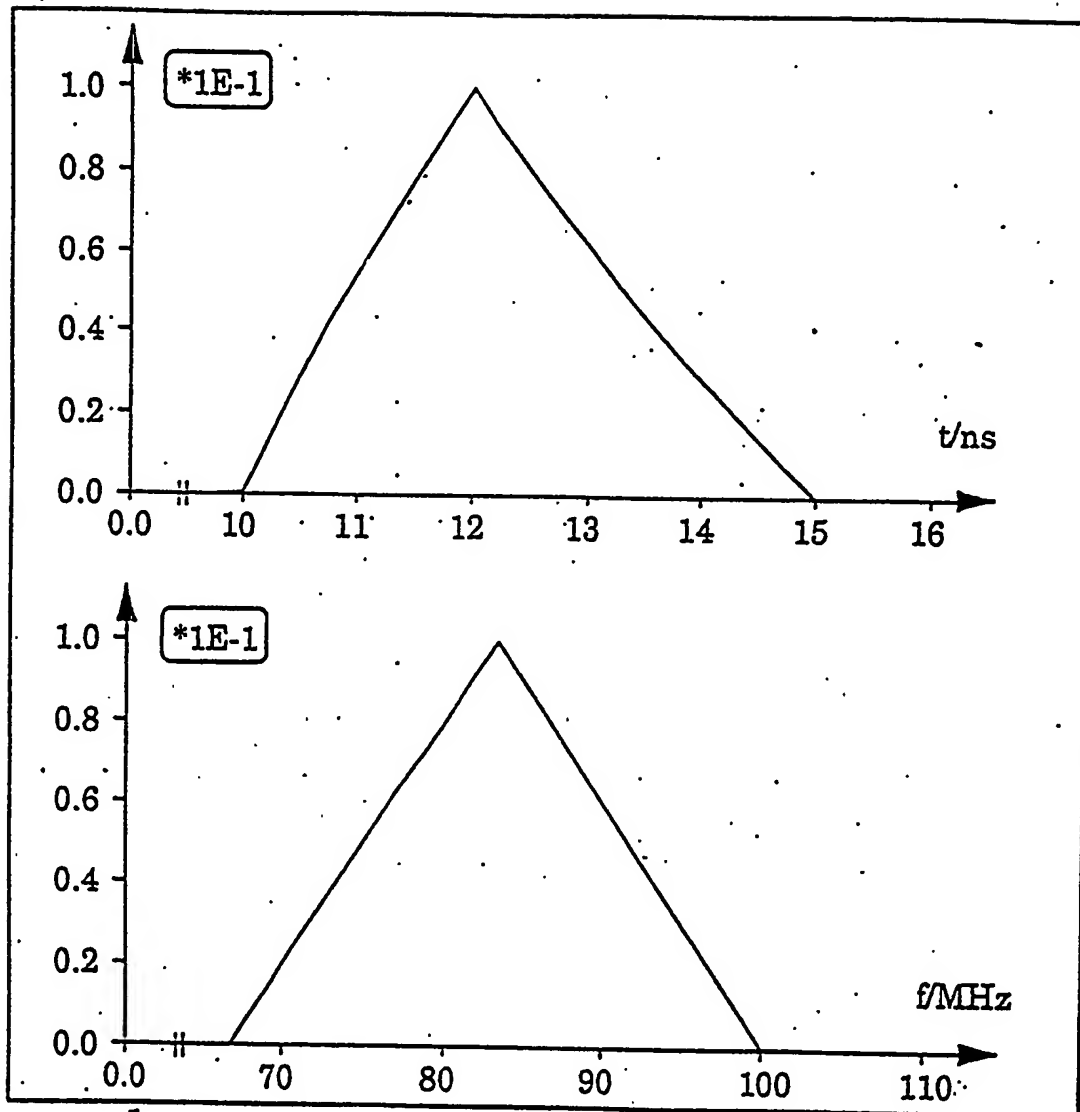
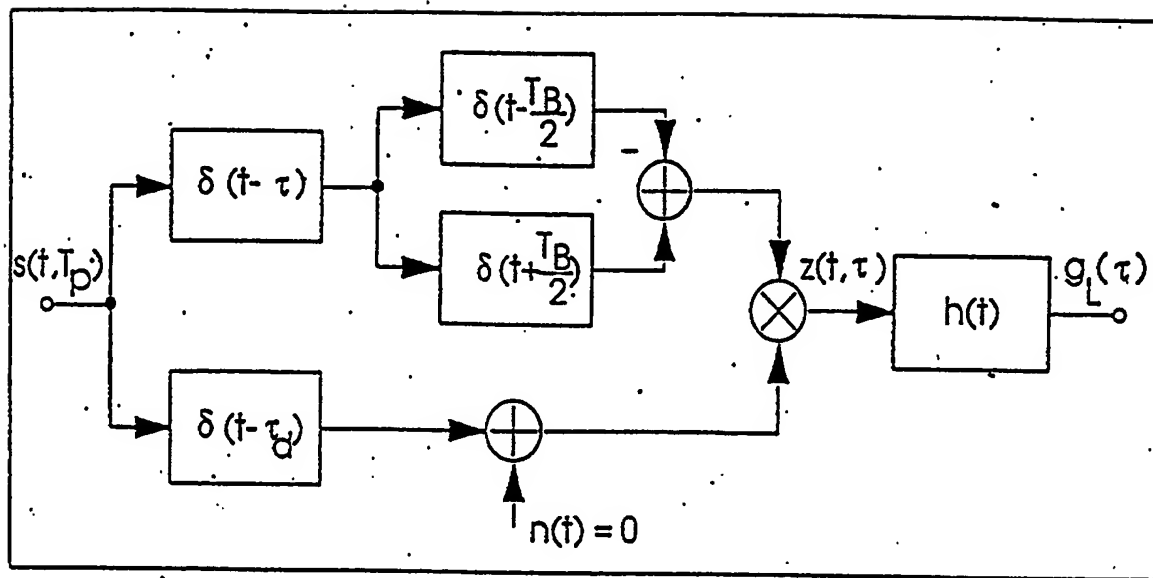


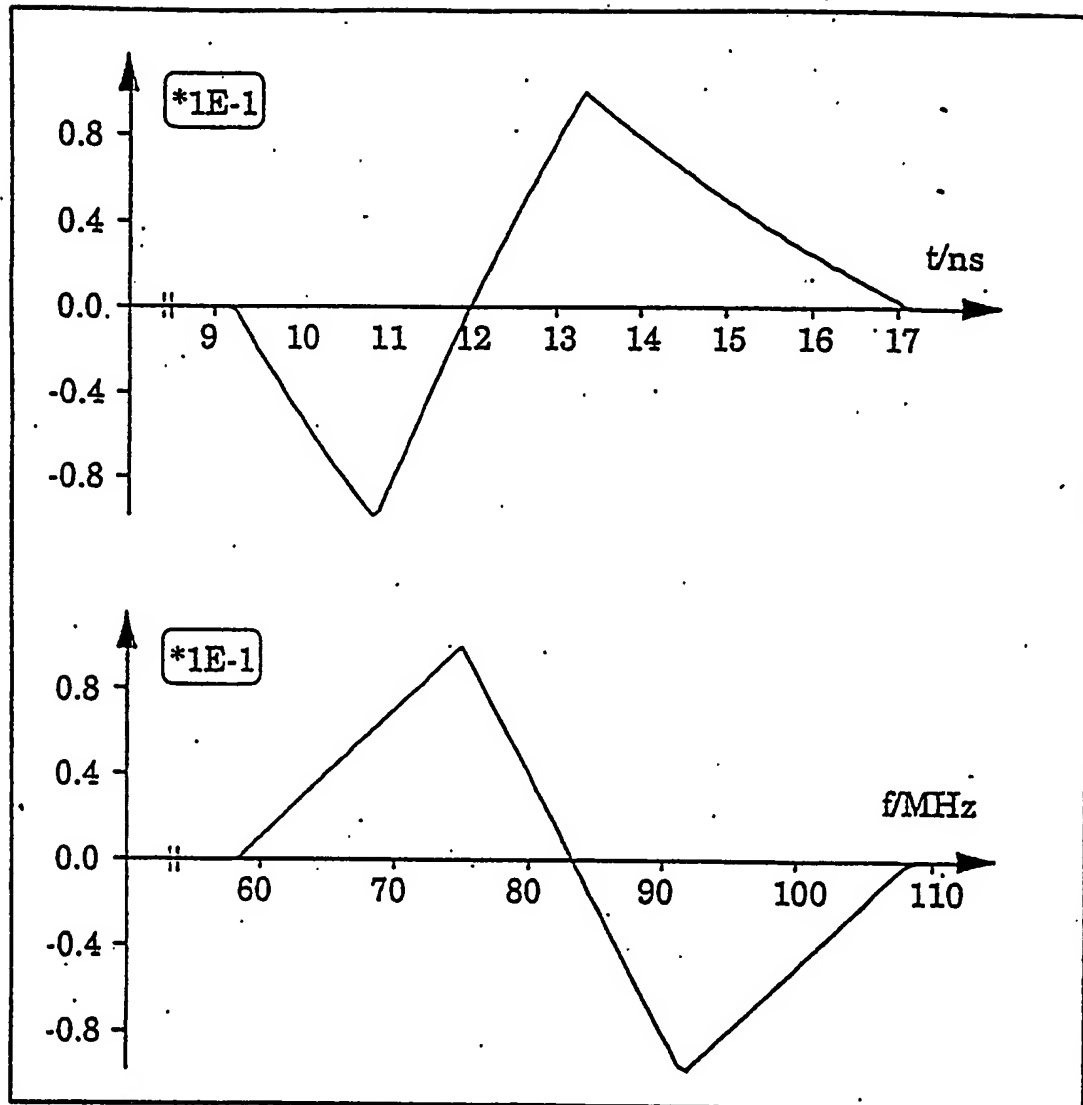
Fig. 14

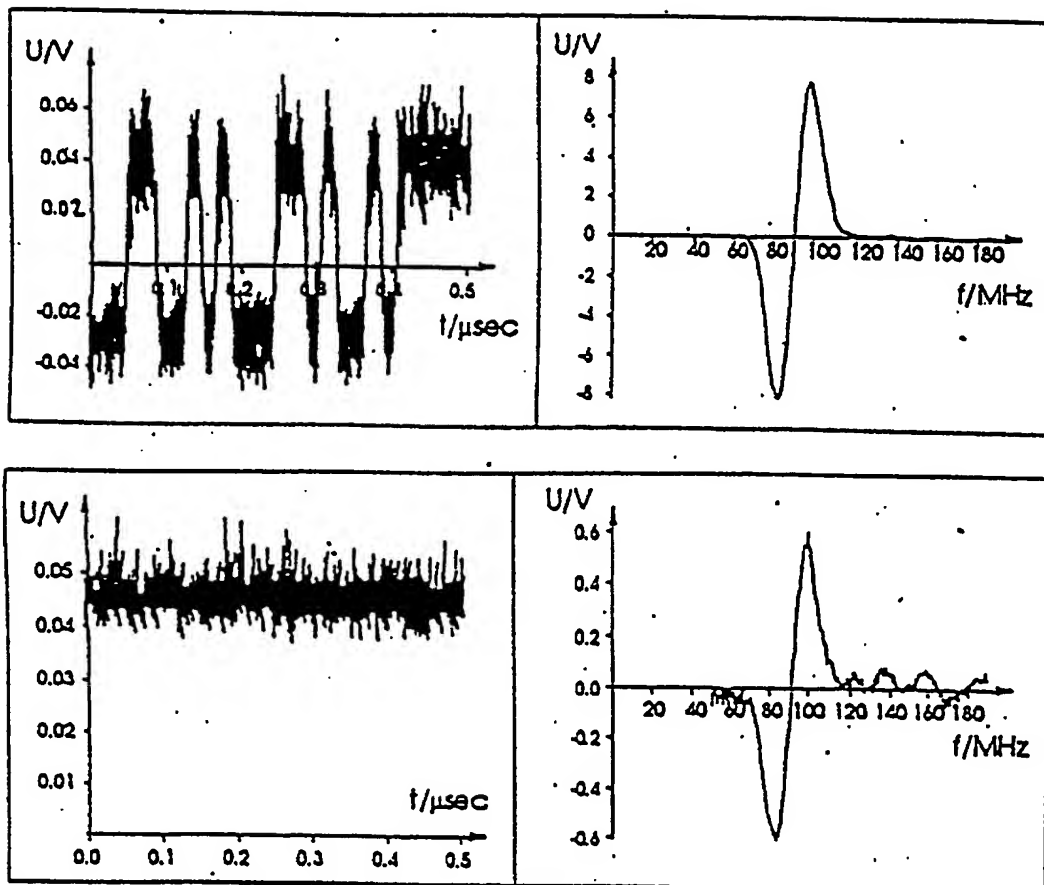
Fig. 15



*Fig. 16*

*Fig. 17*

*Fig. 18*

*Fig. 19*

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKÉWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.